

# INVESTIGANDO A HISTÓRIA DA VEGETAÇÃO (LINHAS DE ÁRVORES) NOS ALPES CENTRAIS: CONTRIBUIÇÕES DA ANÁLISE DE FITÓLITOS

INVESTIGATING THE VEGETATION HISTORY AT THE ALPINE TREELINE IN THE CENTRAL ALPS:  
CONTRIBUTION FROM PHYTOLITHS ANALYSIS

Marco Madella<sup>1</sup>  
Adriana L. Carnelli<sup>2</sup>  
Jean-Paul Theurillat<sup>3</sup>  
Carla Lancelotti<sup>4</sup>

**Resumo:** As variações de altitude na linha de árvores nos Alpes durante o Holoceno foram investigadas principalmente por meio de análises de grãos de pólen e de macrofósseis de plantas. Atualmente é consenso que a floresta atingiu altitudes entre 2.400 e 3.000 metros (acima do nível do mar) durante o Ótimo Climático Atlântico (100 a 300 metros acima da altitude atual). Essa ideia tem sido discutida há alguns anos e agora novas técnicas são necessárias para resolver este debate. Os solos alpinos podem atuar como arquivos de informações consideradas adequadas para a reconstrução da história da vegetação. Neste trabalho discute-se o potencial dos fitólitos<sup>5</sup> preservados no solo como marcador da história da vegetação alpina em ambientes terrestres secos. O conteúdo de sílica biogênica no perfil de solo estudado mostrou-se baixo no horizonte eluvial e maior em profundidade. A concentração de células curtas de gramíneas apresentou pico na parte superior do perfil e drástica diminuição em direção à base do horizonte eluvial. Morfotipos poliédricos de fitólitos foram os mais comuns na base do perfil de solo. Esta abundância pode ser explicada pela dissolução da opala mais solúvel das monocotiledôneas, ou pode ser uma genuína assinatura da presença de espécies arbóreas. Esta segunda hipótese foi confirmada por meio das análises de EDX que demonstrou ser uma poderosa ferramenta para distinguir morfotipos não idiomórfico (*not-idiomorphic*).

**Palavras-chave:** História, vegetação, Fitólitos.

**Abstract:** The altitudinal fluctuations of the treeline in the Alps during the Holocene have been investigated mainly through pollen and plant macrofossil analyses. The consensus today is that the forest reached 2400–2500m a.s.l. during the Atlantic climatic optimum (100 to 300m higher than present). This view has been under discussion for some time now and new techniques are needed to resolve the debate. Alpine soils can act as archives of information suitable for the reconstruction of the vegetation history. The potential of soil phytoliths as tracers of alpine vegetation history in dry terrestrial environments is herein discussed. The biogenic silica content in the soil profile shows a minimum in the eluvial horizon and increases towards the bottom of the profile. The grass *short cells* concentration shows a peak in the upper part of the profile then decreases drastically at the base of the eluvial horizon. Polyhedral phytoliths are the most common morphotypes at the base of the soil profile. Their abundance can be explained by the dissolution of the more soluble opal of monocotyledons or it could be a genuine signature of arboreal species presence in the past. This second hypothesis is confirmed by means of EDX-analysis, which is shown to be a powerful tool to distinguish not-idiomorphic morphotypes.

**Keywords:** History, vegetation, Phytoliths.

<sup>1</sup>ICREA – Department of Archaeology and Anthropology, IMF – Spanish National Research Council, C/Egipcíacues 15, 08001 Barcelona, Spain. Endereço para correspondência: marco.madella@icrea.es

<sup>2</sup>CH-1200 Genève, Switzerland

<sup>3</sup>Centre Alpien de Phytogéographie, Fondation J.-M. Aubert, CH-1938 Champex and Conservatoire et Jardin botaniques de la Ville de Genève, 1 ch. de l'Impératrice, CH-1292 Chambésy Switzerland

<sup>4</sup>CCHS and Department of Archaeology and Anthropology, IMF – Spanish National Research Council, C/Egipcíacues 15, 08001 Barcelona, Spain

<sup>5</sup>Fitólitos são corpúsculos de sílica amorfa (SiO<sub>2</sub>.nH<sub>2</sub>O) formados por plantas que são adicionados aos solos onde podem permanecer por tempo muito longo (Rovner, 1971; Piperno, 1988; 2006). (Nota da tradutora).

## INTRODUÇÃO

Acima de certa altitude nas montanhas do mudo todo ocorre um nítido limite de vegetação. As áreas de vegetação florestal mudam para uma vegetação mais aberta (*Kampfzone* ou *Krummholzzone*) e, em seguida, para uma vegetação sem árvores onde apenas espécies forrageiras e gramíneas conseguem se desenvolver. A altitude desta zona de transição é variável, dependendo dos diferentes fatores regionais e locais. Entretanto, esta variação está correlacionada a valores médios sazonais de temperatura entre 5,5 e 7,5°C e da temperatura do solo por volta de 7°C<sup>6</sup>. A correlação entre temperatura e limite de altitude da floresta é válida até certa latitude e tem sido usada como base para uma explicação funcional das linhas de árvores (limites da floresta).

Certas espécies de plantas necessitam de uma temperatura mínima para a produção de compostos biossintetizadores suficientes para o crescimento celular e para o desenvolvimento e diferenciação de novos tecidos funcionais. A produção de novos tecidos é reduzida principalmente pela inibição da dissipação (*sinkinhibition*) causada pela baixa temperatura<sup>7</sup>. As árvores apresentam crescimento limitado em altitudes mais baixas seguidas por arbustos e ervas. Ao contrário de muitas espécies de gramíneas ou de ervas e arbustos baixos, as árvores não podem se beneficiar do aquecimento radiante do dossel durante o dia, nem do calor armazenado no solo, durante a noite.

Em uma escala global, as temperaturas do ar e do solo parecem ser capazes de predizer a altitude das linhas de árvores em qualquer latitude. Entretanto, outros fatores regionais climáticos e edáficos têm influencia local e direta nas linhas de árvores. Em regiões de clima temperado, como a dos Alpes, as árvores que crescem em altitudes mais elevadas sofrem danos das geadas, dessecação pelo

gelo e danos mecânicos devido a avalanches ou vento. O resultado é a perda de biomassa e a limitação na produção de sementes e processo de desenvolvimento<sup>8</sup>. Esses fatores de stress não são considerados críticos para o estabelecimento das árvores que podem mostrar uma alta plasticidade de fenótipos e podem sobreviver como as *Krummholtz* (indivíduos arbóreos atrofiados). Entretanto, fatores locais são conhecidos para reduzir a probabilidade para rebrota de árvores jovens e para evitar recrutamento (reflorestamento) de árvores em altitudes mais elevadas, portanto, limitando a altitude da ocorrência de linha árvores.

O conjunto de taxa presente em uma determinada área também pode influenciar a altitude da linha de árvores: ecofisiologia e plasticidade de fenótipos desempenham importante papel na determinação da distribuição altitudinal das espécies. Os fatores limitantes para algumas espécies alpinas generalizadas, por exemplo, mostram haver restrições de temperatura para brotação e floração<sup>9</sup>. Outros fatores locais e regionais podem influenciar na variação altitudinal da floresta. Por exemplo, nos Alpes Europeus a atual distribuição da floresta abrange mais as áreas de clima mais continental e/ou árido<sup>10</sup>.

A relação direta entre linhas de árvores e fatores climáticos torna as paleolinhas de árvores um Proxy adequado para reconstrução de mudanças paleoclimáticas<sup>11</sup>. O interesse nas mudanças de vegetação no passado, desencadeadas pelo clima, aumentou nos últimos anos, uma vez que estes dados são necessários para a modelagem de futuras respostas da cobertura vegetal às mudanças. Os ecossistemas em altas montanhas são particularmente vulneráveis as mudanças climáticas. Uma hipótese é que nos Alpes Central um aumento de 3.3° K poderia induzir uma mudança de 600 metros na posição altitudinal da vegetação arbórea<sup>12</sup>. A correlação entre clima e linhas de árvores, não obstante, é muito complexa,

<sup>6</sup>KÖRNER, C. 1999. *Alpine plant life*. Springer.

<sup>7</sup>Idem

<sup>8</sup>TRANQUILLINI, W. 1979. *Physiological ecology of the Alpine timberline. Tree existence at high altitudes with special reference to the European Alps*. Heidelberg, New York: Springer.

<sup>9</sup>THEURILLAT, J.-P., and SCHÜSSEL, A. 2000. Phenology and distribution strategy of key plant species within the subalpine-alpine ecocline in the Valaisan Alps (Switzerland). *Phytocoenologia*, 30: in press.

<sup>10</sup>EGGENBERG, S. 1995. Ein biogeographischer Vergleich von Waldgrenzen der nördlichen, inner und südlichen Schweizeralpen. *Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaft in Bern*, 52: 97-120.

<sup>11</sup>PAYETTE, S., FILION, L., DELWAIDE, A., and BÉGIN, C. 1989. Reconstruction of tree-line vegetation response to long-term climate change. *Nature*, 341:

<sup>12</sup>Idem THEURILLAT E GUISAN (2000)

uma vez que o avanço ou o recuo da área de uma floresta é facilmente provocado pela mudança climática<sup>13, 14</sup>.

As florestas respondem relativamente devagar às mudanças porque o dossel fechado produz um microclima autosustentável favorável à estabilidade e também devido à capacidade de adaptação fenotípica das plantas para agir como inibidor dos efeitos das mudanças. Por milênios, os Alpes Europeus foram submetidos à pressão humana (pastoreio, agricultura e silvicultura). A reconstrução da história de sua vegetação é essencial para o entendimento do grau de impacto das atividades humanas pretéritas e presentes e podem determinar se a vegetação atual está em equilíbrio com os fatores climáticos e ecológicos. A presente pesquisa discute alguns dados preliminares que dizem respeito ao uso da análise de fitólitos em solos dos Alpes para investigar a história da vegetação no ecoclinesubalpino-alpino.

## MÉTODOS

### Localização da área de estudo e vegetação moderna

A região do Valais nos Alpes Suíço (região da geleira Bel Ap-Aletsch) (Figura 1) foi a área do presente estudo. Nesta região, o cinturão de vegetação subalpina – limite mais alto que a floresta pode sobreviver mais alto que a floresta pode se desenvolver – está localizado aproximadamente entre 1.600 e 2.300 m.a.n.m. A vegetação é dominada pela Floresta Boreal (*Piceaabies* (L.) Karst, *Larixdecidua* Miller, *Pinus cembra* L. e *Pinus mugo* Turra), urze com espécies ericóides (*Rhododendronferrugineum* Linn., *Vacciniummyrtillus* L., *Vacciniumuliginosum* L., *Vacciniumvitis-idaea* L., *Arctostaphylosuva-ursi* Spreng., *Callunavulgaris* L.) e arbustos com *Alnusviridis* (Chaix.) DC and *Salixhelvetica* Vill. A vegetação subalpina também é representada pelos

campos dominados pelo *Carexsempervirens* Vill. e *Nardusstricta* L. O cinturão de vegetação alpina – zona onde as árvores estão ausentes – está situado entre a linha de árvores e a linha de neve a 2.300 – 3.000 m a.n.m., e é denominada por urze de arbustos baixos com *Loiseleuriaprocumbens* Desf., *Empetrumnigrum* subsp. *hermaphroditum* (Hagerup) Böcher e *Vacciniumuliginosum* L., ou por relva com *Carexcurvula*.

As amostras de solo foram coletadas em uma sessão localizada a 2.370m a.n.m (BA1), na face S-SE da vertente dominada por pradarias ácidas alpinas.

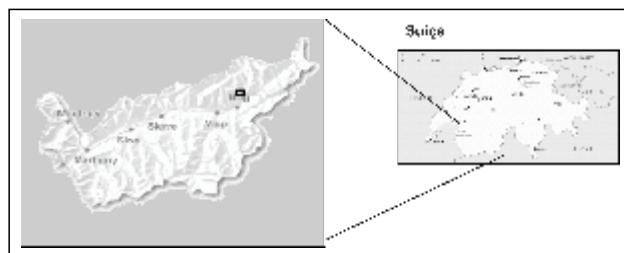


Figura 1. Localização da área – área de Valais no sudoeste da Suíça.

### Solos e análises de fitólitos

A sessão de solo foi descrito conforme o “Referencial Pedológico”<sup>15</sup> e os detalhes metodológicos foram apresentados por Vadi<sup>16</sup>. O material de origem é constituído por rochas gnáissicas.

Foram processadas cerca de cinco gramas de cada amostra de solo para extração e análises dos fitólitos<sup>17</sup>. O material extraído foi usado para montagem de lâminas permanentes com Eukitt (índice de refração 1,5 a 20°C) e observado sob microscópio equipado com fase de contraste ótico e luz polarizada com magnificação de 504X. Considerando-se o propósito da presente pesquisa foi decidido contar somente duas categorias de morfotipos de fitólitos: células curtas de gramíneas<sup>18</sup> e poliédricos. Os poliédricos representam os morfotipos com forma poliédrica irregular que

<sup>13</sup>LAVOIE, C., and PAYETTE, S. 1996. The long-term stability of the boreal forest limit in Subartic Québec. *Ecology*, 77: 1226-1233.

<sup>14</sup>(HÄTTENSCHWILER, S., and KÖRNER, C. 1995. Responses to recent climate warming of *Pinus sylvestris* and *Pinus cembra* within their montane transition zone in the Swiss Alps. *Journal of Vegetation Science*, 6: 357-358.

<sup>15</sup>AFES 1998. *A soundreference base for soils. The "Référentielpédologique"*. INRA Ed.

<sup>16</sup>VADI, G. 1999. *Description et nomenclature des sols de trois sites des Alpes Suisses*

<sup>17</sup>MADELLA, M., POWER-JONES, A. H., and JONES, M. K. 1998. A simple method of extraction of opal phytoliths from sediments using a non-toxic heavy liquid. *Journal of Archeological Science*, 25: 801-803.

<sup>18</sup>METCALFE, C. R. 1960. *Anatomy of Monocotyledons. I. Gramineae*. Oxford: Claredon Press.

podem ter diferentes origens histológicas como as epidermes ou mesodermes, ou ainda podem se originar de rupturas de outros morfotipos. A escolha das células curtas e poliédricas foi definida pela necessidade de traçar a presença de duas estruturas vegetativas distintas: pradarias e floresta. As células curtas são exclusivas de gramíneas e constitui um excelente marcador para este tipo de plantas. Os poliédricos são predominantes (embora não exclusivos) em tecidos de espécies arbóreas.

A concentração de morfotipos de fitólitos no solo (número de fitólitos/grama de solo seco) também foi calculada a partir de modificações de Albert et al.<sup>19</sup>

## RESULTADOS

A sessão de solo estudada foi classificada como um Podzol (Espodosolo cf. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos<sup>20</sup>). Os horizontes de solo apresentaram-se, em geral, bem desenvolvidos e sem evidências de pedoturbação ou de solifluxão.

A sessão apresentou sequência de horizontes E/BPs com transição progressiva da zona eluvial para a zona iluvial (Figura 2). O húmus foi classificado como do tipo eumoder. O horizonte orgânico OF apresentou clara definição, ao contrário do horizonte OH, e era formado basicamente por pelotas fecais. O horizonte AE apresentou-se coeso: textura silto-arenosa com porosidade baixa à média e transição gradual para o horizonte subjacente Eb. Este horizonte também apresentou coesão, textura silto-arenosa, baixa porosidade e transição abrupta para o horizonte subsuperficial EhBPs.

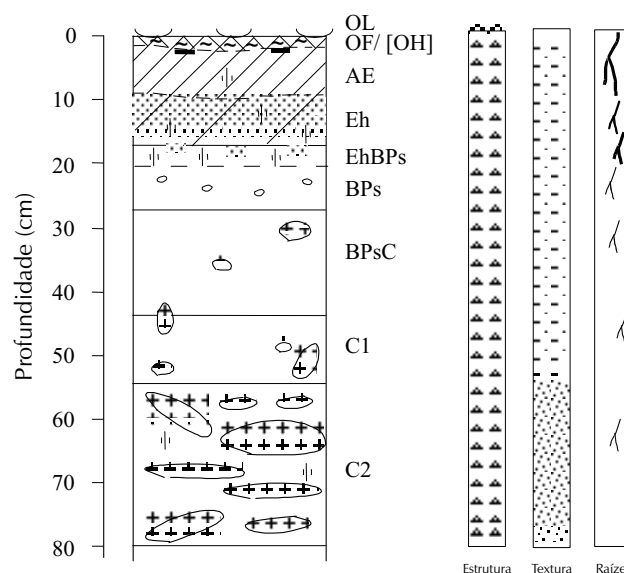


Figura 2. Perfil de solo BA1.

O horizonte EhBPs, de estrutura poliédrica, apresentou baixa estabilidade e conteúdo de cascalho em torno de 10%. O horizonte BPs apresentou estrutura micropoliédrica, baixa estabilidade, porosidade média e mais de 20% de cascalhos. Observou-se transição abrupta para o horizonte BPsC que apresentou estrutura poliédrica, baixa estabilidade, textura silto-arenosa, baixa porosidade e conteúdo de cascalhos entre 30 e 40%. O horizonte C1 apresentou características semelhantes ao do horizonte subjacente, porém com média porosidade e conteúdo de cascalho inferior a 60%. O horizonte mais profundo, C2, apresentou-se fortemente alterado com estrutura micropoliédrica, 90% de cascalho e alta porosidade. As raízes foram observadas nos primeiros 60-70 cm do solo e decrescem notavelmente abaixo dos 30 cm. O solo apresentou pH 5 (em média). A acidez potencial ( $\Delta$ pH) determinada foi alta em todo o perfil ( $>1$ ), especialmente na zona eluvial.

O conteúdo de sílica biogênica dos horizontes de solo (expresso em porcentagem do peso do solo) é apresentado Figura 3. Observa-se que a porcentagem de sílica opalina determinadas é muito baixa nos horizontes superficiais, alta nos horizontes AE e Eh. A partir desses horizontes constata-se aumento progressivo da porcentagem

<sup>19</sup>ALBERT, R. M., LAVI, O., ESTROFF, L., WEINER, S., TSATSKIN, A., RONEN, A., and LEV-YADUN, S. 1999. Mode of occupation of Tabun cave, Mt Carmel, Israel during the Mousterian period: a study of the sediments and phytoliths. *Journal of Archeological Science*, 26: 1249-1260.

<sup>20</sup>EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2.ed. Rio de Janeiro, 2006. 306p. Nota da tradutora.

de sílica em direção aos horizontes subjacente EhBPs e BPs. A concentração de sílica nos horizontes BPsC e C1 é praticamente constante, com uma pequena diminuição em C1.

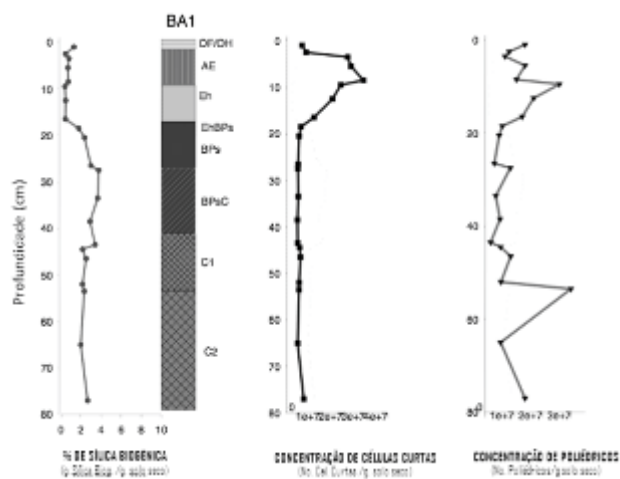


Figura 3. Sílica biogênica, concentração de células curtas e de poliedros no perfil BA1.

A concentração de fitólitos de gramíneas (células curtas) no topo do horizonte orgânico foi muito baixa. Observou-se um pico de frequência para estes fitólitos no horizonte AE, seguido por uma abrupta diminuição no horizonte eluvial Eh. Nos horizontes mais profundos o conteúdo de fitólitos células curtas foi constante. A porcentagem de sílica biogênica total não apresenta correlação com a concentração de células curtas. A partir dos resultados, observou-se a ocorrência de uma variabilidade muito ampla na concentração de fitólitos poliédricos e uma forte zona depleção no horizonte eluvial. É notável a tendência de acumulação deste morfotipo nos horizontes mais profundos.

## DISCUSSÃO

Os resultados aqui discutidos fazem parte de um projeto de pesquisa multidisciplinar em que os dados obtidos por meio de análises de pólen e de microfósseis de solos e de fitólitos são combinados para investigar as variações das linhas de árvores

durante o período Holoceno nos Alpes Centrais Suíços.

A dinâmica das linhas de árvores alpinas no último Pós Glacial foi investigada principalmente por meio de grãos de pólen e de microfósseis de plantas em turfeiras. Considerou-se que, nos Alpes Europeus, a zona florestada subalpina e a Kampfzone atingiram sua elevação máxima no ótimo climático do período Atlântico (5.000 a 6.000 anos A.P.) Neste período estima-se que a floresta chegou a altitudes entre 100 e 300 metros acima das atuais linhas de árvores.<sup>21</sup>

Na região do Valai Central (Alpes Centrais Suíços) infere-se da análise polínica e de microfósseis de plantas que a altitude máxima das linhas de árvores foi 2400m a.n.m.<sup>22</sup>. Entretanto, recentes descobertas na região de Zernatt nos Alpes Centrais Suíços<sup>23</sup> (dados não publicados) de carvão de *Larix decidua* Miller e *Pinus cembra* Linna zona alpina mais elevada, em torno de 2.900-3.000 m a.n.m., mostraram que a linha de árvores atingiu pontos mais elevados nas áreas com clima frio mais continental.

As técnicas de análise de grãos de pólen e de microfósseis de plantas apresentaram vantagens, especificamente quando aplicadas em material coletado de registros sedimentares preservados (sem perturbação) e oferecem importante continuidade temporal. Arquivos lacustres paleoambientais também foram intensivamente investigados, o que possibilitou a obtenção de um grande conjunto de dados<sup>24</sup>. A identificação de grãos de pólen oferece uma perspectiva regional para a identificação de paleoflora. Em escala local, os indicadores mais confiáveis da história das paleolinhas de árvores são os estudos de concentração e influxo de pólen e de microfósseis de plantas (incluindo estômatos de coníferas). Entretanto, em todos esses métodos falta a continuidade espacial nas altitudes mais elevadas onde arquivos úmidos são extremamente raros ou escassos.

A análise do solo, ao contrário, permite uma continuidade espacial praticamente completa e, portanto, parece ser mais apropriada para o estudo

<sup>21</sup>VORREN, K.-D., MORKVED, B., and BORTENSCHLAGER, S. 1993. Human impact on the Holocene forest line in the Central Alps. *Vegetation History Archaeobotany*, 2: 145-156

<sup>22</sup>TINNER, W., and AMMANN, B. 1996. Treeline fluctuations recorded for 12,500 years by soil profiles, pollen, and plant macrofossils in the Central Swiss Alps. *Arctic and Alpine Research*, 28: 131-147.

<sup>23</sup>THINON, M. 1992. *L'analyse pédoanthracologique, aspects méthodologiques et applications*, Aix-Marseille III. (Inédito).

<sup>24</sup>AMMANN, B. 1995. Paleorecords of Plant Biodiversity in the Alps. *Arctic and Alpine Biodiversity*. K. Chapin, ed., Berlin: Springer.

das relações entre os fatores ambientais (como altitude/temperatura) por meio de transectos. Os solos constituem uma fonte de informação paleoambiental e atributos como os horizontes, a cor, a textura, e a micromorfologia podem ser preservados por longo tempo, ainda que os processos que os tenham originado já não estejam ativos.

Estudos pioneiros usando biossequências de solos (conjunto de solos onde os fatores abióticos são similares) na região de Valais (Alpes Centrais Suíços) foram realizados por Tinner e Ammann<sup>25</sup>. Esses autores demonstraram que a análise de solo (baseada em microfósseis, sequência polínica e em carvões encontrados no solo) de área cuidadosamente selecionada pode ser uma importante ferramenta na investigação das paleolinhas de árvores. A partir dos resultados obtidos através dessa abordagem multidisciplinar em perfis de solos ao longo de um transecto altitudinal os autores conseguiram reconstruir a altitude máxima das linhas de árvores no Holoceno.

Uma abordagem inovadora e complementar pode ser encontrada nos estudos de solos alpinos de macro e microfósseis de plantas preservados nestes arquivos secos. Fitólitos e carvões são, de fato, componentes comuns nos solos. O estudo das partículas de carvão no solo (pedoantracologia) foi realizado para reconstruir a evolução da vegetação lenhosa em ambientes afetados por incêndios<sup>26, 27</sup> com identificação e datação de madeira queimada recolhida do solo. Considerando que a presença de carvões é uma prova direta da presença de espécies lenhosa – uma concepção que ainda não é amplamente aceita – a

pedoantracologia é um método com uma resolução espacial muito ampla.

A ocorrência de carvões nos solos, entretanto, é resultado de um evento limitado no tempo e no espaço e por esta razão não apresenta continuidade temporal oferecida pelo registro polínico. Após um evento de fogo (incêndio) os carvões são fragmentados e enterrados no solo como consequência de fatores bióticos e abióticos. Em geral, as partículas encontradas nas partes profundas do solo ocorrem em função do tempo, embora isto nem sempre seja a única causa, pois em solos com intensa atividade biológica a pedofauna e os pequenos vertebrados podem causar pedoturbações.<sup>28</sup>

A resolução espacial dos microcarvões ainda é um tema em discussão. Somente poucos estudos experimentais de diferentes ecossistemas a respeito do transporte de madeira queimada após eventos de fogo foram desenvolvidos<sup>29, 30</sup>. De acordo com convenções da pedoantracologia, somente são considerados os fragmentos >400 µm de tamanho, a fim de excluir os fragmentos muito pequenos. O potencial taxonômico dos carvões para os taxa alpinos é considerado elevado uma vez que eles normalmente podem ser identificados até o nível de gênero. Entretanto, uma longa e detalhada análise anatômica é necessária devido ao tamanho muito pequeno da maioria dos fragmentos. A análise de carvão foi empregada em diferentes estudos paleoambientais de paleolinhas de árvores em diferentes biomas como nos Alpes franceses<sup>31</sup> em ecossistemas floresta-tundra<sup>32</sup>.

Os dados sobre a produção de sílica em plantas de comunidades alpinas no noroeste do Cáucaso<sup>33, 34</sup> preliminarmente discutidos neste

<sup>25</sup>Idem pág. 151.

<sup>26</sup>PAYETTE, S., and GAGNON, R. 1985. Late Holocene deforestation and tree regeneration in the forest-tundra of Québec. *Nature*, 313: 570-572.

<sup>27</sup>TALON, B., CARCAILLET, C., and THINON, M. 1998. Etudes pédoanthracologiques des variations de la limite supérieure des arbres au cours de l'Holocène dans les Alpes Françaises. *Géographie physique et Quaternaire*, 52: 195-208.

<sup>28</sup>CARCAILLET, C., and THINON, M. 1996. Pedoanthracological contribution to the study of the evolution of the upper treeline in the Maurienne valley (North French Alps): methodology and preliminary data. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 91: 339-416

<sup>29</sup>Idem pág. 151.

<sup>30</sup>CLARK, J. S. 1988. Particle motion and the theory of charcoal analysis: source area,

<sup>31</sup>Idem pág. 152

<sup>32</sup>Idem pág. 152

<sup>33</sup>BLINNIKOV, M. S. 1994. Phytolith analysis and Holocene dynamics of alpine vegetation. *Experimental investigations of alpine plants communities in the northwest Caucasus*. V. G. B. Onipchenko, M. S., ed., Zürich: Veröffentlichungen des Geobotanischen Instituts der Eigenossisch Technischen Hochschule, Stiftung Rübel, Heft, 23-40.

<sup>34</sup>CARNELLI, A. L., MADELLA, M., and THEURILLAT, J.-P. 2001. Biogenic silica production in selected alpine plant species and plant

trabalho, mostram que a análise de fitólitos pode contribuir na reconstrução da história da vegetação dos solos alpinos. Esta abordagem oferece um alto grau de resolução espacial e um retrato mais detalhado da vegetação herbácea que não é registrada pelos carvões e que frequentemente é muito próxima daquela registrada pelo conjunto polínico. A comunidade de plantas (exemplo: campo x floresta) pode ter uma produção de sílica opalina notavelmente diferente<sup>35</sup> e a variabilidade na concentração do conteúdo de sílica biogênica no solo foi usada em estudos de reconstrução de paleovegetação<sup>36, 37</sup>. O tempo de entrada integrada (input) de sílica biogênica das comunidades vegetais pode ser calculado (exemplo: Carnelli et al) e os valores estimados podem ser comparados com o atual conteúdo de sílica biogênica de um solo e sua idade para reconstruir a história da vegetação de uma área. Nas comunidades de plantas nos Alpes, a entrada (input) anual de sílica biogênica nas pradarias subalpinas foi estimada em uma ordem de magnitude maior do que a das espécies arbóreas<sup>38</sup>. Portanto, é possível traçar os limites entre vegetação de campo e de floresta através do conteúdo de opala nos solos alpinos.

No perfil de solo analisado, a distribuição da sílica biogênica parece ser comandada principalmente pelos processos de lixiviação do solo. A opala é perdida do horizonte eluvial e acumulada na zona de eluviação. Os processos que os fitólitos sofrem após a deposição no solo não estão completamente entendidos. Um modelo de compartimentação<sup>39</sup> parece ser o mais eficiente para descrever a distribuição da sílica biogênica total no horizonte BA1.

A hipótese é que a primeira fração de fitólitos se dissolve no horizonte BPs e então é

lixiviado pela água, enquanto uma fração residual, constituída de fitólitos com tempo de vida mais longo, é deslocada para a base do perfil. Dados de resistência da sílica biogênica pela dissolução em condições naturais são raros (exemplo Bartoli<sup>40</sup>). Entretanto, sob condições experimentais foi observado que fitólitos de gramíneas foram menos resistentes do que as de dicotiledôneas e gimnosperma<sup>41</sup>. A distribuição de células curtas e fitólitos poliédricos parecem estar em concordância com os valores encontrados, isto é, as células curtas de gramíneas já apresentam sinais de dissolução no topo do perfil de solos ainda que a concentração nos horizontes eluviais diminua. Somente uma pequena fração de células curtas é preservada no horizonte mais profundo. Ao contrário, a concentração de fitólitos poliédricos varia significativamente e aumenta nos horizontes mais profundos do perfil.

A maior variabilidade na concentração de fitólitos poliédricos ao longo do perfil provavelmente é o resultado de uma mistura de origem histológica desses morfotipos. Além disso, uma fração deste grupo também pode originar-se da fragmentação de outros morfotipos. Fitólitos poliédricos são muito comuns em tecidos de espécies de dicotiledôneas e gimnosperma da vegetação alpina e subalpina (Carnelli, dados não publicados da coleção de referência de plantas alpinas) e eles constituem a maioria dos morfotipos produzidos por tecidos lenhosos<sup>42</sup> (ver Albert et al., 2000). Pode-se inferir que o aumento de fitólitos poliédricos nos horizontes mais profundos pode estar associado à presença de vegetação de floresta no passado. Entretanto, outras evidências independentes são necessárias para sustentação desta hipótese.

---

communities. *Annals of Botany*, 87: 425-434.

<sup>35</sup>Idem

<sup>36</sup>WITTY, J. E., and KNOX, E. G. 1964. Grass opal in some chestnut and forested soils in north central Oregon. *American Soil Science Society Proceedings* 685-687;

<sup>37</sup>BAKEMAN, M. E., and NIMLOS, J. 1985. The genesis of mollisols under Douglas fir. *Soil Science*, 140: 449-452.

<sup>38</sup>CARNELLI, A. L., MADELLA, M., THEURILLAT, J.-P., and AMMAN B. 2002. Aluminum in the opal silica reticule of phytoliths: a new tool in palaeoecological studies. *American Journal of Botany*, 89: 346-351

<sup>39</sup>ALEXANDRE, A., MEUNIER, J.-D., COLIN, F., and KOUD, J.-M. 1997. Plant impact on the biogeochemical cycle of silicon and related weathering processes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61: 677-682.

<sup>40</sup>BARTOLI, F. 1983. The biogeochemical cycle of silicon in two temperate forest ecosystems. *Environ. Biogeochem. Ecol. Bull.* 35:469-476.

<sup>41</sup>BARTOLI, F., and WILDING, L. P. 1980. Dissolution of biogenic opal as a function of its physical and chemical properties. *Soil Science Society American Journal*, 44: 873-878.

<sup>42</sup>Ver ALBERT, R. M., LAVI, O., ESTROFF, L., WEINER, S., TSATSKIN, A., RONEN, A., and LEV-YADUN, S. 1999. Mode of occupation of Tabun cave, Mt Carmel, Israel during the Mousterian period: a study of the sediments and phytoliths. *Journal of Archeological Science*, 26: 1249-1260.

Para investigar a origem dos fitólitos poliédricos uma abordagem não morfológica foi adotada no presente trabalho, isto é, a análise elementar da sílica biogênica por meio da técnica de microanálise de raios-x. Os dados do material da coleção de referência de plantas subalpinas e alpinas da área de estudo mostraram presença de alumínio contido, principalmente, nos fitólitos de espécies arbóreas<sup>43</sup>. Esses resultados vêm ao encontro dos primeiros trabalhos de Bartoli<sup>44</sup> e mais recentemente de HODSON e SANGSTER<sup>45</sup>. Testes preliminares realizados durante esta pesquisa indicaram a presença de alumínio também em fitólitos de *soil-born*, portanto esta técnica pode ser empregada como marcador para a origem dos fitólitos.

pelo suporte logístico e a M. Moore por ter corrigido o inglês do manuscrito original. Gostaríamos de expressar nossa mais profunda gratidão a Marcia R. Calegari por nos convidar a apresentar este texto na Revista Espaço Plural e pela meticulosa tradução do idioma Inglês com a ajuda de Dayane Kelly Israel Smaniotto.

Artigo recebido em 15.07.2011.

Artigo aprovado em 05.10.2011.

## CONCLUSÃO

O potencial dos fitólitos encontrados nos solo como marcadores da história da vegetação alpina em ambiente terrestre foi discutido neste trabalho. O conteúdo de sílica biogênica no perfil de solo foi mínimo no horizonte eluvial e aumentou nos fragmentos da base do perfil. A concentração de células curtas de gramíneas apresentou um pico na parte superior do perfil e drástica diminuição na base do horizonte eluvial. Os fitólitos poliédricos foram os morfotipos mais comuns na base do perfil e essa abundância pode ser explicada pela dissolução das opalas mais solúveis de monocotiledôneas ou pode ser uma assinatura genuína da presença de espécies arbóreas no passado. Esta segunda hipótese foi comprovada por meio de microanálise de raios-x, uma importante ferramenta para distinguir morfotipos não idiomórficos.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pela SwissNational Science Foundation (Projeto FNRS 31-52911.97 para J. P. Theurillat). As descrições e análises do solo foram realizadas por G. Vadi. Agrademos os Professores W. Widi e B. Ammann

<sup>43</sup>Idem pág. 153

<sup>44</sup>BARTOLI, F., and WILDING, L. P. 1980. Dissolution of biogenic opal as a function of its physical and chemical properties. *Soil Science Society American Journal*, 44: 873-878.

<sup>45</sup>HODSON, M. J., and SANGSTER, A. G. 1999. Aluminium/silicon interactions in conifers. *Journal of Inorganic Biochemistry*, 76: 89-98.